

連載講座

超入門 ようこそ、まぐねの国に
第1回 こんなところにも磁性体が

Ultra-Primer: Welcome to Land of Magnetics
Chapter 1 Magnetic Materials in Daily Life

佐藤勝昭 (独)科学技術振興機構

K. Sato, Japan Science and Technology Agency

Tel: +81-3-3512-3547, Fax: +81-3-3512-3548, E-mail: katsuaki.sato@nifty.com

This series of "ultra-primer" aims at providing a tutorial introduction for beginners of magnetism. The first chapter is dedicated to show how magnetic materials are used in common life.

はじめに

磁性の初学者の多くが、『まぐねの国』の入口には、しかつめらしい顔をした『磁気物性』の鬼が門番をしていて、難しい『なぞなぞ』に答えないと門を開けてもらえないと考えているようですがそんなことはありません。

確かに、まぐねの国で生活するには『磁気物性』の知見があるかないとは大違い。最近では、先端的な応用と基礎となる『磁気物性』の距離がますます短くなっているで、なおさらです。

この超入門講座では、『まぐねの国』で道に迷った初学者たちに対し、道しるべとなるガイドブックを提供することを目的としています。ときには、いきなり聞き慣れない『まぐね語』が出てくるかもしれませんが、必ずどこかで説明しますので、とりあえずは『呪文』だと聞き流してください。

第1回は、出口からのアプローチです。すなわち、私がガイドとなって、身近にある磁性体を見つけながら、そこに潜んでいる『磁気物性』と『まぐね語』を一つひとつ解き明かしていく散策に出かけます。さあ、スタートです。

第1章 こんなところにも磁性体が...

(a) クルマと磁性体

エコカーとして電気自動車EVやハイブリッドカーHVが注目されています。EV, HVでは動力源にモーターが使われます。EVに限らず自動車にはたくさんのモーターが使われています。窓の開閉、パワーステアリング、ワイパー、ブレーキ、ミラー等々、高級車では100個ものモーターが使われています。このほかにも磁性体は、センサー、トランスミッション、バルブなどにも使われています。

Fig. 2はブラシレス・モーターの仕組みを模式的に描い

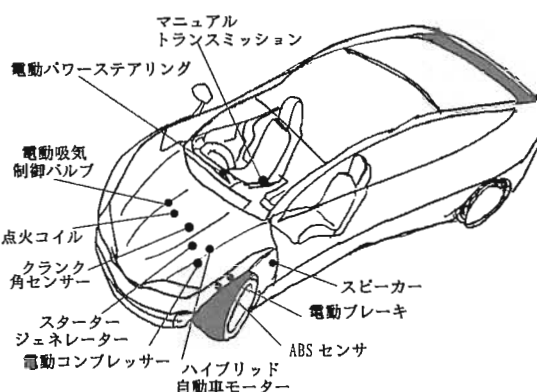


Fig. 1 ハイブリッドカーには多数の磁性体が使われている。

日立金属のWebサイト

(<http://www.hitachi.co.jp/environment/showcase/solution/materials/neomax.html>)を参考に作図。

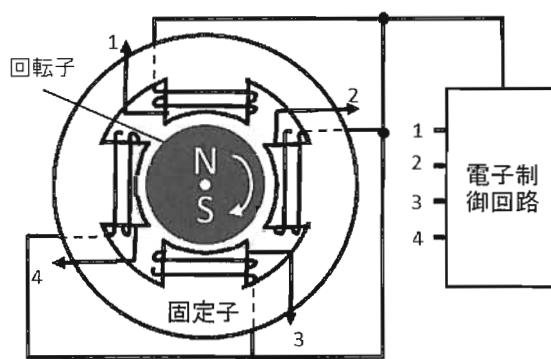


Fig. 2 ブラシレスDCモーターの仕組みの模式図。

TDKのWebサイト

(<http://www.tdk.co.jp/techmag/ninja/daa00253.htm>)を参考に作図。

たものです。中央には永久磁石という磁性体が回転子として使われています。ローターを多数の固定子を取り囲んでいます。固定子は磁性体にコイルを巻いた電磁石です。電磁石に流す電流を、隣の電磁石に電子回路によって次々に切り替えることによって電磁石が発生する磁界を移動させ、磁界に回転子がついていくことで回転します。

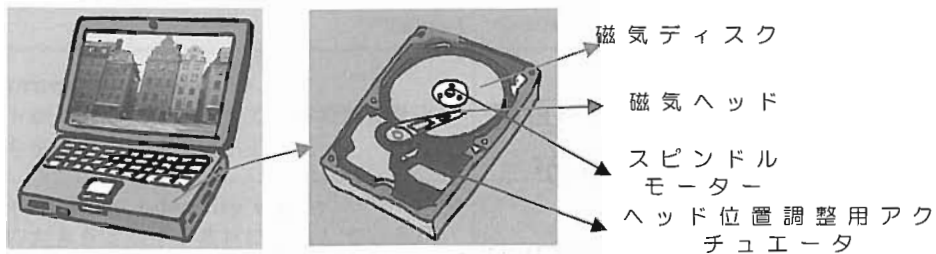


Fig. 3 パソコンのハードディスクドライブ (HDD) には、記録媒体としてハード磁性体が、記録ヘッドにはソフト磁性体が使われている。
(図の典拠：佐藤勝昭「理科力をきたえる Q & A」 p. 101)

永久磁石としては、日本で開発されたネオジウム磁石がつかわれています。この磁石は、レアアースであるネオジウム (Nd) と鉄 (Fe) の化合物 $\text{NdFe}_2\text{B}_{14}$ を主成分とするもので、温度特性を改善する目的でディスプレイシウム (Dy) など他のレアアースが添加されています。磁力の強さを表すエネルギー積 BH_{max} が一番高く、小型で性能のよいモーターが作れるのです。近年、世界最大の供給国である中国の生産調整によってレアアースが高騰して、マスコミを賑わせていることはご存じだと思います。

永久磁石にちょっとやさそつと外部磁界を加えても $N \cdot S$ をひっくり返すことができませんよね。このように磁化反転しにくい磁性体をかたい磁性体 (ハード磁性体) といいます。磁性体のかたさを表す尺度として、 $N \cdot S$ を反転させるために必要な磁界の強さ『保磁力』を使います。

一方、固定子の電磁石においてコイルを巻くための磁心 (コア) は、モーターの外枠 (ヨーク) に取り付けられています。コアやヨークに使う磁性体は、電流によって発生する磁界によって直ちに大きな磁束密度が得られる磁性体でなければなりません。このためには、保磁力が小さく、比透磁率 μ_r の大きなやわらかい磁性体 (ソフト磁性体) が求められます*1。

モーター用のソフト磁性体としては、小型のものにはパーマロイ (鉄とニッケルの合金) が、大型のものにはケイ素鋼板 (鉄とケイ素の合金) が使われます。

(b) コンピュータと磁性体

コンピュータの大容量記憶を受けもつハードディスク (HDD) には、多数の磁性体が活躍しています。このうち回転する磁気記録媒体 (円盤状なので磁気ディスクと呼ばれる) では、デジタルの情報を NSNS... という磁気情報の列 (トラックと呼ばれる) として円周上に記録されています。一度 NS の向きを記録したら、永久磁石のようにいつまでも変わらないことが必要ですから、磁気的にかたい磁性体 (ハード磁性体) が使われます。ただし、永久磁石

とちがって、磁気ヘッドの磁界によって NS の向きを反転できないと記録できませんから、適当な保磁力をもつ磁性体が使われます。よく使われるのは、コバルト (Co) とクロム (Cr) と白金 (Pt) の合金の多結晶薄膜です。磁性というと鉄が思い浮かびますが、HDD の記録媒体に鉄が使われていないのはビックリですね。最近の高密度 HDD には、日本で発明された垂直磁気記録方式が使われていますが、このための記録媒体には裏打ち層という磁束の通り道がつけてありますがこれにはソフト磁性体が使われています。

磁気ディスクに磁気情報を書き込んだり、記録された磁気情報を読み出したりするのが磁気ヘッドです。磁気ヘッドは可動のヘッドアセンブリ (ジンバルと呼ばれる) の先のスライダに取り付けられており、磁気ディスクの数ナノメートル上空に浮上しています。磁気情報をディスクの磁性体書き込むには、マイクロメータサイズの小さな電磁石を使います。電磁石のコイルも薄膜で作られています。コイルで発生した磁界を磁気ディスク媒体に伝えるための磁心 (コア) としては、ソフト磁性体の薄膜が使われます。記録されるビットの円周方向のサイズは数十 nm という小ささなのでヘッドにはナノメートルの加工精度が要求されます。

磁気ディスク媒体に記録された磁気情報を電気信号に変えて読み出すために以前はコイルが使われていましたが、1990年代の半ばから、磁気の強さを電気抵抗の変化を通して電気信号に変換する「磁気抵抗 (MR) 素子」が使われます。この素子には、ノーベル物理学賞受賞で有名な巨大磁気抵抗効果 (GMR)、あるいは、トンネル磁気抵抗効果 (TMR) が使われます。MR 素子には、極めて薄い非磁性体をソフト磁性体で挟んだ多層膜が使われています。GMR、および、TMR 効果については、連載講座の後のほうで詳しく述べます。

HDD には、磁気ディスクと磁気ヘッドのほか、ディスクを高速回転させるためのスピンドルモーター、磁気ヘッドを移動させて指定された番地に位置決めするためのアクチュエータにも磁性体が使われています。

(c) 変圧器 (トランス)

交流の電圧を上げたり下げたりするための仕掛けが変圧

*1 比透磁率：コイルが作る磁界を H とすると、磁性体がないとき磁束密度 B は $B = \mu_0 H$ で与えられますが、磁性体があると磁束は比透磁率倍になります。式で書くと $B = \mu_r \mu_0 H$ で表されます。

器（トランス）です。トランスにおいては、コア（磁芯）と呼ばれる軟磁性体に1次コイルと2次コイルの二つのコイルが巻いてあります。1次コイルに交流電圧を加えるとコア内に交流磁束が発生、2次コイルはこの交流磁束による磁気誘導で、巻き数比に応じた交流電圧を出力します。コアには、1次電流に磁束が追従するように磁氣的にやわらかいソフト磁性体が使われます。トランスでは磁性体のヒステリシスや渦電流によってエネルギーが熱として失われるので、保磁力が小さく、電気抵抗率の高い材料が好まれます。このため、積層ケイ素鋼板やフェライト（絶縁性の鉄の酸化物）が使われます。電柱の上に灰色の円筒が乗っていますが、あの円筒の容器には油の中にトランスが入っています。油は絶縁を保つとともに、トランスの熱を外に逃がすためのものです。

(d) 光ファイバー通信と磁性体

家庭にまで光ケーブルが敷かれ、私たちは高速のインターネット通信やデジタルテレビジョン放送を楽しめるようになりました。光ケーブルには光ファイバーが使われ、大量のデジタル情報を光信号として伝送しています。光ファイバー通信の光源は半導体レーザー（LD）です。レーザー光はデジタルの電気信号のオンオフにしたがってピコ秒という短い時間で点滅しています。

もし通信経路のどこかから反射して戻ってきた光がLDに入るとノイズが発生して信号を送ることができなくなります。これを防ぐために、使われるのが光を一方通行にし

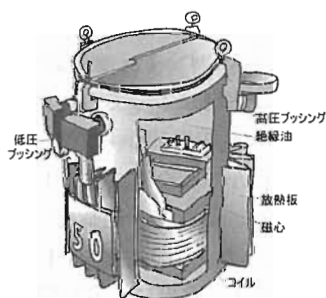


Fig. 4 柱上トランスには磁心としてソフト磁性体が使われている。中部電力のサイト (http://www.chuden.co.jp/kids/kids_denki/home/hom_kaku/index.html) を参考に作図。

て戻り光をLDに入らなくする光アイソレーターです。これには、通信用の赤外光を透過する希土類鉄ガーネットという磁性体の磁気光学効果（ファラデー効果）が使われています。

第1章のQ & Aコーナー

ハード磁性体、ソフト磁性体

Q1: 身の回りには、ずいぶんたくさんの磁性体が使われているのですね。ところで、ハード磁性体、ソフト磁性体という話の中ででてきた磁性がかたいとかやわらかいという表現がよくわかりません。

A: まぐねの国では、磁性体に磁界を加えたとき、弱い磁界でも磁化の反転（N・Sのひっくり返り）が起きるなら「やわらかい」、強い磁界を与えないと磁化が反転しないとき「かたい」と表現します。これを説明するには磁気ヒステリシスの知識が必要です。

Fig. 6は、磁性体を特徴づけるヒステリシス曲線です。横軸は、外部磁界Hの強さ、縦軸は磁化Mの大きさを表しています。詳しくは第4回に説明しますが、磁化Mが反転する磁界Hを保磁力H_cと呼び、磁性体の「かたさ」を表します。

図において、永久磁石材料であるハード磁性体SmCo₅は磁化を反転させるのに200万 A/m（約25 kOe）もの磁界が必要なのでかたいのですが、ソフト磁性体センデルタでは地磁気の大きさより小さ

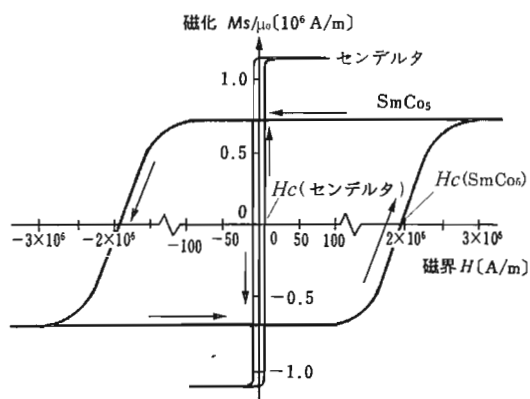


Fig. 6 ハード磁性体SmCo₅とソフト磁性体センデルタの磁気ヒステリシス曲線。佐藤勝昭編著「応用物性」(オーム社) p. 208 図5.10による。

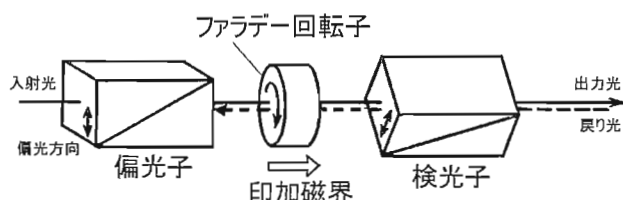


Fig. 5 光ファイバー通信において戻り光が半導体レーザーに入ることを防ぐための光アイソレーターには、通信用赤外線に対して透明な磁性体YIGがファラデー回転子として使われている。

い 10 A/m (約 0.13 Oe) で簡単に反転するくらいや
わらかいことがわかります。

磁界

Q2: ヒステリシス曲線の横軸は磁界だと説明されまし
たが、磁場とは違うのですか？ また、A/mとかOe
とかいう単位がよくわかりません。

A: まぐねの国に入って、まず戸惑うのが、表記や単
位が統一されていないことです。表記が学問体系に
よって異なる場合もあります。例えば、magnetic
fieldという英語ですが、電気系では磁界と訳し、物
理系では磁場と訳すなどの違いがありますが、同じ
ことです。

さらには、磁界の単位も、国際標準では、SI系の
[A/m] (アンペアパーメートル) を使うことが推奨さ
れていますが、いまでも多くの書物ではcgs-emuの
[Oe] (エルステッド) を使っていたりします。A/m
とOeの関係は

$$1[\text{Oe}] = 1000/4\pi[\text{A/m}] = 79.7[\text{A/m}] \text{ です。 逆に}$$

$$1[\text{A/m}] = 4\pi/1000[\text{Oe}] = 0.01256[\text{Oe}] \text{ です。}$$

また、磁束密度 B の単位であるSI系の [T] (テス
ラ)、あるいはcgs-emu系の [G] (ガウス) を磁界の
単位として使うこともよく行われます。電磁気学に
は、EH対応系 (電界 E , 電束密度 D , 磁界 H , 磁束密
度 B の四つのパラメータを使う) とEB対応系 (電界
 E , 電束密度 D , 磁界 B の三つのパラメータを使う) が
あります。EB対応系では、EH対応系の H を使わな
いで磁束密度を表す B を用いるのです。 B はSIとcgs
の換算が簡単 ($1[\text{T}] = 10,000[\text{G}]$) なので、こちらを使
うのが便利だということもあって磁界を [T] で表すの
です。

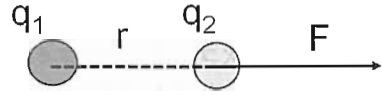
この連載では、EH対応のSI系を使いますが、文
献との比較のときなど必要に応じてcgs-emuを使いま
す。

Q3: なぜ磁界をA/mと電流で表すのですか？

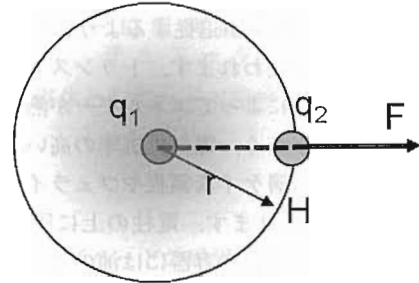
A: はじめ、磁界はクーロンの法則で力によって定義
されていました。距離 r だけ離れた磁荷 q_1 と磁荷 q_2
の間に働く力 F は、磁気に関するクーロンの法則 $F =$
 kq_1q_2/r^2 で与えられます。 k は定数です。 q_1q_2 が同符
号なら反発し、異符号なら引き合います。磁極 q_1 が
つくる磁界 H 中に置かれた磁極 q_2 に働く力 F は $F =$
 q_2H で与えられるので、 q_1 の作る磁界は $H = kq_1/r^2$ で
表されます。

ガウスの定理により、半径 r の球面上の全磁束は中
心の磁荷に等しいので、 $4\pi r^2 B = q_1$ となり、磁界は
 $H = q_1/4\pi\mu_0 r^2$ で表されるのでクーロンの式の係数 k は
 $k = 1/4\pi\mu_0$ であることがわかりました*2。

*2 μ_0 は真空の透磁率で $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$ です。



(a) 二つの磁荷 q_1 と q_2 の間に働く力



(b) q_1 による磁界 H が q_2 に力を与えると考え

Fig. 7 磁界を力によって定義する。

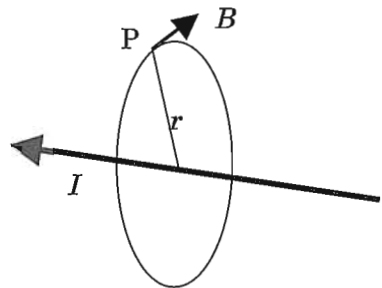


Fig. 8 電流による磁界の定義。

単磁極が存在しないのに、それを使って磁界を定
義するのは合理的ではありません。そこで注目したの
が電流の作る磁界です。Fig. 8においてP点の磁界は
ビオサバールの法則によって $H = B/\mu_0 = (I/2\pi r)$ です。
つまり、1 [A] の直線電流から $1/2\pi$ [m] 隔てた点につ
くる磁界は1 [A/m] となります。1 [A] の電流が作る
リング状の磁界にそって、磁荷を一周させたときの
仕事が1 [J] だったとき、磁荷は1 [Wb] と定義しま
す。磁束密度 B は、磁界に垂直に流れる1 [A] の電流
の1 [m] あたりに作用する力が1 [N] となると $B =$
1 [T] と定義されています。

永久磁石

Q4: モーターのところで永久磁石としてネオジム磁石
のことが出ましたが、ほかにどのような磁石がある
のか、ネオジム磁石はほかに比べてどれほど強い
のか教えてください。

A: 磁石 (永久磁石) を販売しているある会社の製品
一覧を見ると、ネオジム $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, サマコバ
 SmCo_5 , フェライト (BaFe_2O_4), アルニコ (AlNiCo) と
いうのが書かれています。ネオジム磁石はレアア
スの1つであるネオジム Nd と鉄とホウ素の金属間化
合物、フェライトは鉄の酸化物です。サマコバもア

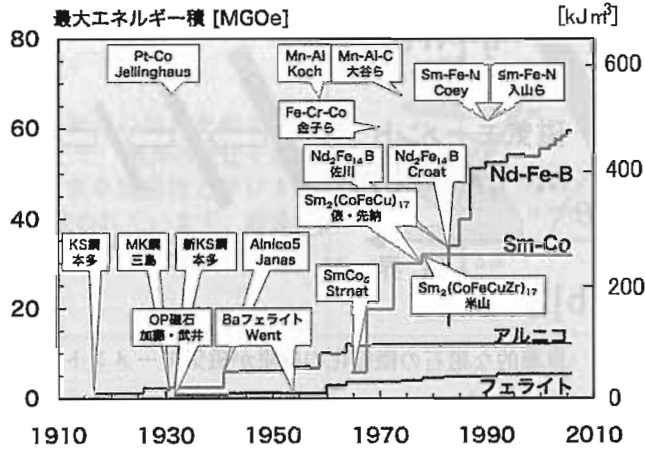


Fig. 9 永久磁石のエネルギー積 BH_{max} の変遷。(日本人の活躍が目立つ)
佐藤勝昭「理科力をきたえるQ&A」(ソフトバンククリエイティブ, 2009) p. 95の図「磁石特性の推移」に加筆。

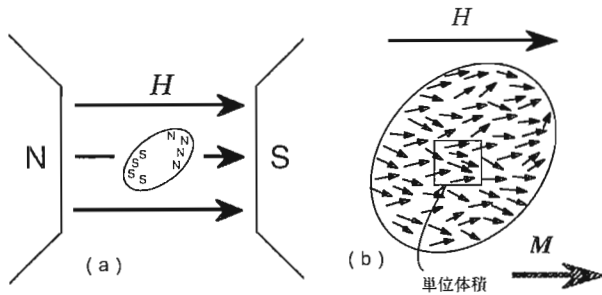


Fig. 10 磁化は単位体積当たりの磁気モーメントとして定義される。
出典：高梨弘毅「磁気工学入門」(共立出版, 2008) p. 10, 図 1.7, 図 1.8.

ルニコも主成分は鉄ではありません。

Fig. 9は、永久磁石の性能指数であるエネルギー積 BH_{max} (磁石が蓄えることのできる最大の磁気エネルギーで、 $B-H$ ヒステリシス曲線の面積に相当) 変遷を表すグラフです。日本の佐川博士が開発したネオジム磁石の登場でいかに飛躍的に向上したかがわかるでしょう。

磁化

Q5: Fig. 6のヒステリシス曲線の縦軸の磁化という言葉がいま一つピンときません。磁化とは何ですか。

A: 磁性体に磁界 H を加えたとき、Fig. 10(a)に示すようにその表面には磁極が生じます。つまり磁性体は一時的に磁石のようになりますが、そのとき磁性体は磁化されたといいます。

磁性体の中にはFig. 10(b)に矢印で示す磁気モーメントがたくさんあります。磁気モーメントについてはQ6で説明しますが、矢の先がN、後ろがSであるような原子サイズの磁石だと考えてください。

単位体積内の磁気モーメントのベクトル和をとったものを磁化^{*3}といいます。磁界を加える前に磁気モーメントがランダムに向いておれば、ベクトル和

つまり磁化 M はゼロですが、磁界を加えると磁化はゼロでない値をもち、(a)のようにN極とS極が誘起されるのです。

k 番目の原子の1原子当たりの磁気モーメントを μ_k とするとき、磁化 M は式 $M = \sum \mu_k$ で定義されます。和は単位体積について行います。Q6で述べるように磁気モーメントの単位は $[\text{Wb}] \times [\text{m}]$ ですから、磁化の単位は体積 $[\text{m}^3]$ で割って $[\text{Wb}/\text{m}^2]$ となります。これは磁束密度 B の単位である $[\text{T}] = [\text{Wb}/\text{m}^2]$ と同じです。

磁気モーメント

Q6: 磁気モーメントを説明してください。

A: 電気の場合、 $+q$ と $-q$ の電荷のペア距離 r だけ離れているとき、電気双極子モーメントは qr で表されます。

一方、磁気については、電荷と違って単磁荷はありませんから、磁極は必ず、N・Sの対で現れます。そこで、仮想的な磁荷のペア $+q$ と $-q$ を考え、磁荷間の距離 r を無限に小さくしても $m = qr$ は有限な値を保つと考えます。必ずN・Sが対で現れるなら $m = qr$ というベクトルを磁性を扱う基本単位と考えることができます。これを磁気モーメントと呼び矢印で表します。単位は $[\text{Wb} \cdot \text{m}]$ です。

Fig. 11に示すように一様な磁界 H 中の磁気モーメント $m = qr$ を置いたとき、磁気モーメントに働くトルク T は磁界とモーメントのなす角を θ として次式で表されます。

$$T = qHr \sin \theta = mH \sin \theta$$

磁気モーメントのもつポテンシャルエネルギー E は、トルクを θ について積分することによって

*3『磁化』の代わりに、電気分極に倣って、『磁気分極』という用語を使っている教科書もあります。

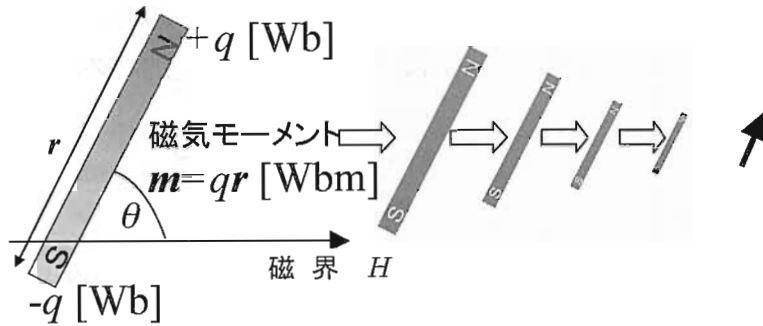


Fig. 11 仮想的な磁石の微細化の極限が磁気モーメントとなる。

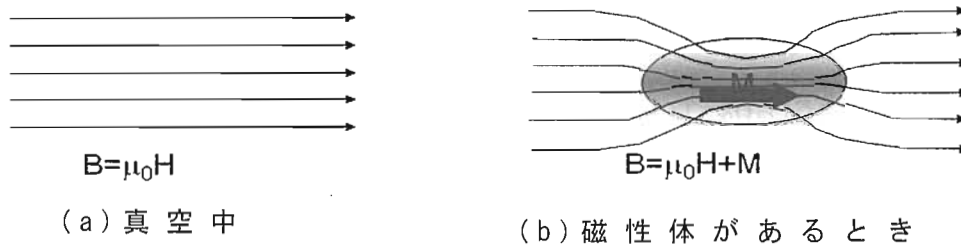


Fig. 12 (a)真空中と(b)磁化Mの磁性体における磁束密度B.

$E = \int T d\theta = \int m H \sin \theta d\theta = 1 - m H \cos \theta$
 となりますが、ポテンシャルの原点はどこにとってもよいので $E = -m \cdot H$ と磁気モーメントと磁界のベクトル内積で表すことができます。mが磁性の最小単位である磁気モーメントです。単位は $E[\text{J}] = -m[\text{Wb} \times \text{m}] \times H[\text{A/m}]$

第2回に述べるように、原子には、この磁気モーメントが作るのと等価な磁界を作り出す回転電流が存在すると考えます。原子では電子の回転運動が角運動量量子Lで決まるので、回転電流の代わりに、角運動量量子数で記述します。

磁束密度Bと磁化M

Q7: 磁化曲線の縦軸として磁化Mではなく、磁束密度Bが使われている図がありますが、BとMの関係を教えてください。

A: Fig. 12に示すように磁界Hのあるとき、真空中の磁束密度は $\mu_0 H$ ですが、磁化Mの磁性体の中の磁束密度Bは、真空中の磁束密度に磁化Mによる磁束密度Mを加えたものになります。すなわち、

$$B = \mu_0 H + M$$

と表されます*4。磁化Mが外部磁界Hに比例するとき、その比 $\chi = M/\mu_0 H$ を磁化率 (susceptibility) と呼びます。物理の分野では帯磁率と呼ぶことがあります。磁化率を使うと、上の式は $B = \mu_0 (1 + \chi) H$ と書き直すことができます。一方、電磁気学で学んだようにBとHの関係は比透磁率 μ_0 を用いて $B = \mu_r \mu_0 H$ と表せますから、比透磁率は磁化率を

*4 EB対応では $B = \mu_0 (H + M)$ と表します。この場合、Mの単位は $[\text{A/m}]$ です。

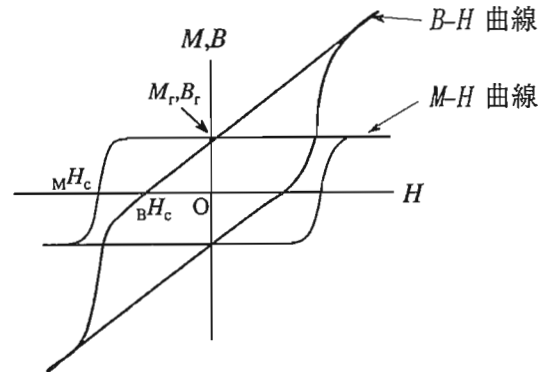


Fig.13 B-H曲線とM-H曲線とは保磁力が異なる。
 出典：高梨弘毅「磁気工学入門」
 p. 45, 図2.8 (一部改変)。

用いて

$$\mu_r = 1 + \chi$$

と書けます。

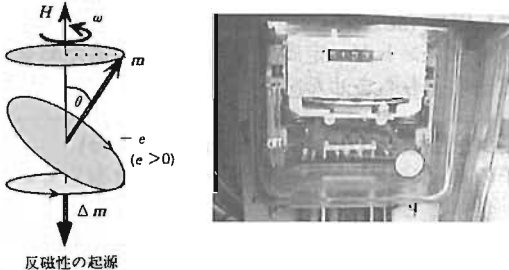
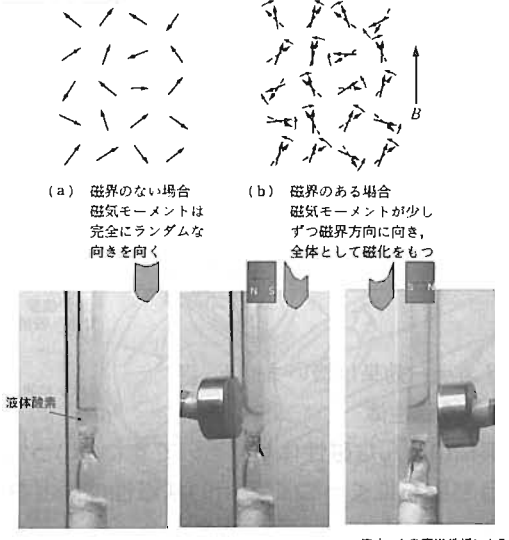
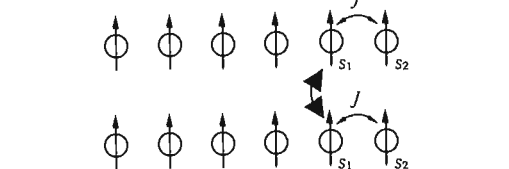
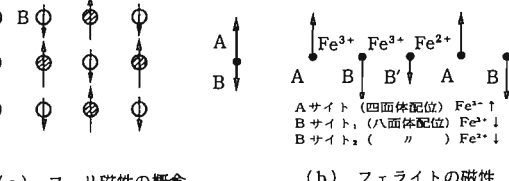
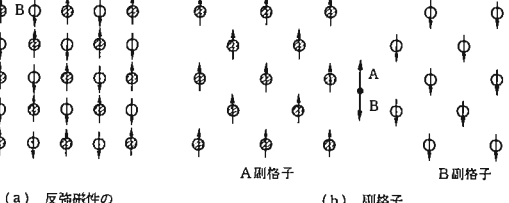
磁化曲線にヒステリシスがあるときは、Fig. 13のようにM-H曲線とB-H曲線では保磁力が異なります。M-Hにおける保磁力を $M H_c$ 、B-Hにおける保磁力を $B H_c$ と区別して書くことがあります。

磁性体

Q8: 磁性体という言葉の説明なしに使っていましたが、磁性について説明してください。

A: 磁性とは、物質が磁界の中に置かれたときに起きる磁気的な変化のしかたを表すことばです。どんな物質も何らかの磁性を示します。例えばヒトの体でも、水分子の H^+ (プロトン) の核磁気モーメントが

Table 1 磁性の分類

<p>反磁性 (diamagnetism) 銅やアルミニウムなど導電性の物体に磁界を加えると、物質内に回転する電流が生じて、磁界の変化を弱めようとします。このような性質を反磁性と呼びます。積算電力計にはこの性質が使われています。超強磁界中でリングが浮上するのもリングが反磁性を示すからです。</p>	 <p>反磁性の起源</p>
<p>常磁性 (paramagnetism) ルビー（クロムを含む酸化アルミニウム）のように遷移金属を含む絶縁物の多くは、ランダムに向いている磁気モーメントをもっており、強い磁界を加えると磁界方向に向きを変えて、磁界に引きつけられる性質、常磁性をもちます。液体酸素も常磁性をもつので図のように磁石に引き寄せられます。バナジウム、白金などの金属においては、自由電子が起源のパウリの常磁性と呼ばれる常磁性が見られます。</p>	 <p>(a) 磁界のない場合 磁気モーメントは完全にランダムな向きを向く</p> <p>(b) 磁界のある場合 磁気モーメントが少しずつ磁界方向に向き、全体として磁化をもつ</p> <p>液体酸素</p> <p>東大 小島嘉道教授による</p>
<p>強磁性 (ferromagnetism) 鉄やコバルトのように磁界を加えなくても磁気モーメントの向きがそろって自発磁化をもっている物質は強磁性体と呼ばれます。ハードディスクや電気自動車のモーターに使われるのは強磁性体です。</p>	
<p>フェリ磁性 (ferrimagnetism) 隣り合う原子の磁気モーメントが逆向きだが大きさが違うため全体では正味の磁化が残っている磁性。フェライトや磁性ガーネットはその代表格です。</p>	 <p>(a) フェリ磁性の概念</p> <p>(b) フェライトの磁性</p> <p>A サイト (四面体配位) $Fe^{3+} \uparrow$ B サイト (八面体配位) $Fe^{3+} \downarrow$ B' サイト (") $Fe^{2+} \downarrow$</p>
<p>反強磁性 (antiferromagnetism) 隣り合う原子の磁気モーメントが逆向きで全体では磁化が打ち消されている磁性。磁化をもつ副格子Aと逆向きの磁化をもつ副格子Bの重ね合わせと見ることができます。</p>	 <p>(a) 反強磁性の磁気モーメント</p> <p>(b) 副格子</p> <p>A 副格子 B 副格子</p>

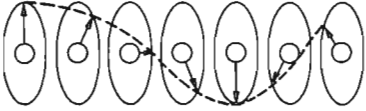
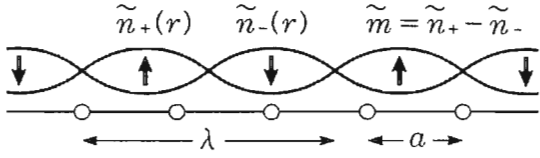
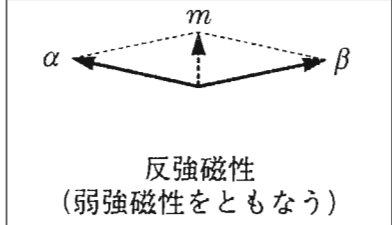
強磁界中で磁気共鳴することを用いてMRIという診断が行われていることはご存じですね。強磁界中に置くとリングも浮き上がります。このように、どんな物質も磁性をもつのです。

Table 1 に示すように、磁性は、反磁性、常磁性、

強磁性、フェリ磁性、反強磁性、らせん磁性、SDW (スピン密度波)、傾角反強磁性などに分類されます。

超伝導状態にある物質には磁束が侵入できません。これをマイスナー効果と呼びます。第2種の超伝導では磁束は磁束量子として侵入します。この連載では、

Table 1 つづき

<p>らせん磁性 (screw magnetism) 磁気モーメントが一定周期で回転しているため全体として磁化をもちません。</p>	
<p>スピン密度波 (SDW: spin density wave) 電子のスピン大きさと向きが波状に分布している状態。全体として磁化は生じない場合(Cr)と一つの向きのスピンの優勢で正味の磁化をもつ場合(Mn₂Si)がある。スピン密度波の周期aは必ずしも結晶格子の周期λと一致しない。</p>	
<p>傾角反強磁性 (canted antiferromagnetism) 反強磁性において二つの副格子磁化が傾いたために、副格子磁化と垂直方向に正味の磁化が生じる場合を傾角反強磁性と呼ぶ。希土類オルソフェライト等に見られる。</p>	 <p style="text-align: center;">反強磁性 (弱強磁性をとまなう)</p>

マイスナー効果は扱いません。

磁石につく磁性体

Q9: 実にいるんな磁性体があるのですね。いったいそのうち磁石にくっつく実用的な磁性体はどれですか？

A: 実際に使われる磁石にくっつく磁性体は、上の表のうち、自発磁化をもつ強磁性体とフェリ磁性体です。磁石につくという点では、オルソフェライトなど傾角反強磁性体もくっつきますが磁化は非常に弱いです。鉄やコバルトなどは、磁界を加えなくても原子の磁気モーメントの向きがそろっているため磁化があるのです。これを鉄の磁性という意味で ferromagnet (強磁性体) といいます。フェライトでは、隣り合う原子磁気モーメントが反強磁性的に(互いに逆方向に)そろえあっているのですが、両方でモーメントの大きさが異なっているため、全体として正味の自発磁化が残っています。これをフェライトの磁性という意味で ferrimagnet (フェリ磁性体) といいます。ふつう磁性体といえば、強磁性体とフェリ磁性体を指します。

一方、反磁性体、反強磁性体などは、自発磁化をもたないので、弱い磁界ではくっつきませんので、非磁性体と呼ばれます。常磁性体は、Table 1に掲げた液体酸素のように低温、強磁界の下では磁石にくっつきますから、非磁性体と呼ぶべきではありませんが、室温、弱い磁界においては非磁性体として扱うことができます。

自発磁化

Q10: 前の質問に出てきた自発磁化を説明してください。

A: 磁界を加えなくても磁気モーメントの向きがそろっている状態です。これは、磁気モーメントどうしにそろえあう力が働いているためです。自発磁化は強磁性体において見られます。反強磁性体でも、同じ磁気モーメントの向きの集団(副格子)の中では自発磁化があるが、もう一つの副格子の自発磁化と打ち消し合って、マクロの磁化が失われています。フェリ磁性体では、副格子磁化のバランスが崩れているために、差し引きの結果、正味の自発磁化が残っています。自発磁化の起源については第3回に詳述します。

参考書

1. 志村史夫監修/小林久理眞著：したしむ磁性。朝倉書店、1999。
2. 高梨弘毅著：磁気工学入門—磁気の初歩と単位の理解のために—(現代講座・磁気工学)。共立出版、2008。
3. 長岡洋介著：電磁気学Ⅰ 電場と磁場(物理入門コース)。岩波書店、1982。
4. 佐藤勝昭編著：応用物性(応用物理学シリーズ)第5章(執筆者：高橋研)。オーム社、1991。
5. 佐藤勝昭著：光と磁気(改訂版)(現代人の物理シリーズ)。朝倉書店、2001。

(2011年1月12日受理)

佐藤勝昭 さとう かつあき

1966 京都大学大学院工学研究科修士課程修了工学博士、1966 日本放送協会、1984 東京農工大学助教授、1989 同教授、2005 同理事・副学長、2007 同退職・名誉教授、2007 科学技術振興機構現在に至る。

主な著書 光と磁気、応用物性、金色の石に魅せられて、理科力をきたえるQ&A、太陽電池のキホン